大面积等离子体片分层现象的实验研究

夏俊明[1,2] 孙越强[1] 霍文青[1] 孙海龙[1] 白伟华[1*] 柳聪亮[1] 孟祥广[1]
(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190;2. 中国科学院大学 北京 100190)

Experimental study of Stratification of Large Planar Plasma Sheet

Xia Junming[1,2*], Sun Yueqiang[1], Huo Wenqing[1], Sun Hailong[1], Bai Weihua[1*], Liu Congliang[1], Meng Xiangguang[1]
(1. *Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*;
2. *The University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190, *China*)

Abstract The stratification of the largeplanar plasma sheet, 60 cm × 60 cm in size, 200 μs for duration, and generated by pulsed magnetic confinement linear hollow cathode discharge at 150 Pa, was experimentally investigated. The evolution of the 2-D electron density distribution in sheet's normal direction was diagnosed with Langmuir probe and recorded with a fastoscilloscope in the rotating hollow cathode method. The impact of the magnetic field and discharge current on the electron density characteristics was studied. The results show that the magnetic field and discharge current significantly affect the stratified electron densitywith a bimodal distribution. For example, generated at 2 A, as the magnetic field intensity increased from 0.0 to 3×10^{-2} T, the bimodal-peak distance increased from 0.0 to 8.4 mm; whereas at 3×10^{-2} T, as the discharge current increased from 1 to 4 A, the distance decreased from 8.6 to 5 mm. In a word, a combination of an increased magnetic field and a decreased discharge current widens the bimodal peaks.

Keywords Linear hollow cathode, Large planar plasma sheet, Electron density distribution, Fast Frame

摘要 为了研究大面积等离子体片的分层特性,利用脉冲磁约束线形空心阴极放电装置,在150 Pa氦气中产生了持续时间为200 μs、面积为60 cm×60 cm的大面积等离子体片。采用快帧法和旋转空心阴极法利用郎缪尔探针首次获得了等离子体片分层时厚度方向电子密度分布及其演化构成的二维分布图;基于获得的二维分布图,研究了分层等离子体片厚度方向电子密度的分布特征与磁场强度和放电电流的关系。实验发现,等离子体片分层时厚度方向电子密度呈现双峰曲线分布特征;当放电电流为2 A,磁场强度为1.5×10^{-2},2.25×10^{-2},3×10^{-2} T时,双峰间距分别为0,3.2,8.4 mm;当磁场为3×10^{-2} T,电流为1,2,3,4 A时,双峰间距分别为8.6,8.2,6.8,5 mm。结果表明:分层等离子体密度峰值间距随着磁场的增强和放电电流的降低而增大。

关键词 线形空心阴极 大面积等离子体片 电子密度分布 快帧
中图分类号:O539 **文献标识码**:A **doi**:10.13922/j.cnki.cjovst.2016.02.10

磁约束线形空心阴极在增强型辉光放电模式下形成的等离子体片具有面积大、电子密度高、稳定性好的优点,其在微波领域具有重要的应用价值[1-2]。20世纪90年代初,美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL) Agile Mirror项目中,研究人员首次将这种大面积等离子体片代替金属面板应用于X波段微波波束切换[2-4]。1998年Manheimer等[5]对这种大面积等离子体片在新型微波器件中的应用进行了研究。2014年Gillman等[6]利用这种大面积等离子体片模拟再入飞行器表面的等离子体鞘套,对消减黑障的途径进行了研究。大面积等离子体片在微波领域应用的物理基础在于其对

收稿日期:2015-02-13
基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(41405039,41405040)
*联系人:Tel:13810474697;E-mail:bjbwh@163.com

电磁波的反射、吸收及相移特性,而这些特性取决于等离子体片自身的参数分布。脉冲磁约束线形空心阴极放电形成的大面积等离子体片在较高磁场条件会发生分层的现象,严重情况下单一的等离子体片会分成两个独立的等离子体片,许多研究者对这一现象进行了报道[5,7]。然而,目前对大面积等离子体片分层现象研究较少,尤其是对等离子体片分层现象的实验研究尚未见报道。本文利用类似于 NRL 的脉冲磁约束线形空心阴极放电装置,对大面积等离子体片的分层现象开展了实验研究。

1　实验系统

1.1　实验装置

本文采用的大面积等离子体片产生和参数采集装置如图1所示。放电阴极为黄铜制作的线形凹槽状空心阴极,长度、宽度、深度分别为 60 cm、1.6 cm、1.2 cm,阳极是由黄铜制作的金属圆板,其与阴极相对放置于圆柱形有机玻璃放电腔体中心,间距 60 cm。与树脂玻璃放电腔体同轴放置一对亥姆霍兹线圈,加载直流电流后,其在放电腔体内产生均匀磁场用于约束等离子体成片状结构,磁场大小在 $0\sim3.5\times10^{-2}$ T 内连续可调。脉冲电压源输出频率为 50 Hz、脉宽 200 μs 、电压值在 0~6 kV 连续可调的放电脉冲,其经过一个 90 Ω 的限流电阻 R_1 加载到阴阳电极两端,电路中并联一个 2000 Ω 的电阻 R_2,用于在放电结束后快速释放电极间储存的电能。输入输出比为 1 A/100 mV 的 Pearson 线圈用于测量等离子体放电电流,所测信号由示波器读取,示波器利用衰减后的脉冲电压源信号作为触发源。实验所用气体为氦气,纯度为99.999%,由气阀从树脂玻璃腔体顶部注入,气体流量计控制注气的快慢,放电过程中流量计与位于放电腔体底部的真空泵一同维持工作气压保持动态平衡。

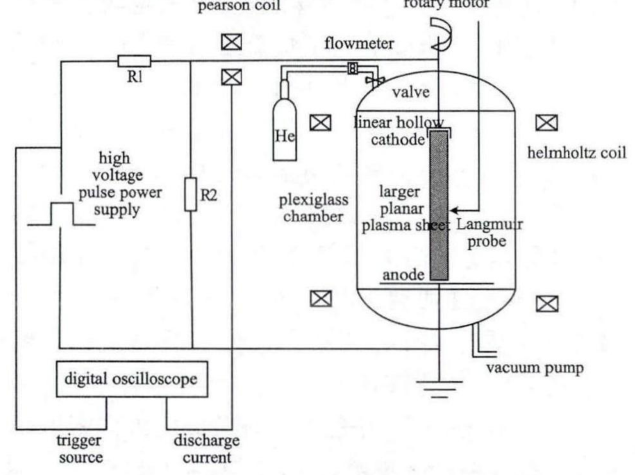


图1　大面积等离子体片产生及参数诊断实验装置

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental setup

1.2　诊断测量及数据处理

郎缪尔探针广泛应用于等离子体参数诊断[8]。实验中设计的郎缪尔探针为半径 0.2 mm,长度 4 mm 的钨圆柱体,由真空腔体顶部插入,放电过程中其位置固定在竖直方向距离线形空心阴极 30 cm、水平方向偏离等离子体面中心约 10 cm 的位置。为实现探针对等离子体片厚度方向参数的扫描,设计了一个步进旋转电机,其转轴与线形空心阴极连接轴固定在一起,旋转量由控制平台输入脉冲数精确控制,角度旋转精度为 0.00125°,每次旋转量根据几何关系提前计算好,计算依据为空心阴极每次旋转后探针中心相对于旋转后的等离子体片在厚度方向正好移动 2 mm。图2为根据计算结果绘制的探针等效扫描效果图,d 为等离子体片厚度方向距离,l 为水平向距离,短斜线表示郎缪尔探针,* 点表示阴极每次旋转后探针中心点的位置,实验中共设计21个点覆盖厚度方向 4 cm 的扫描范围,由图可知探针在阴极旋转过程中水平方向的偏移量小于 0.5 cm,Ding 等[9]的研究已经表明等离子体片在水平方向上具有很好的均匀性,因此,水平方向的偏移对测量结果的影响可以忽略,Mathew 等[10]和 Zhang 等[7]都曾利用类似的旋转法测量了大面积等离子体片厚度方向参数。

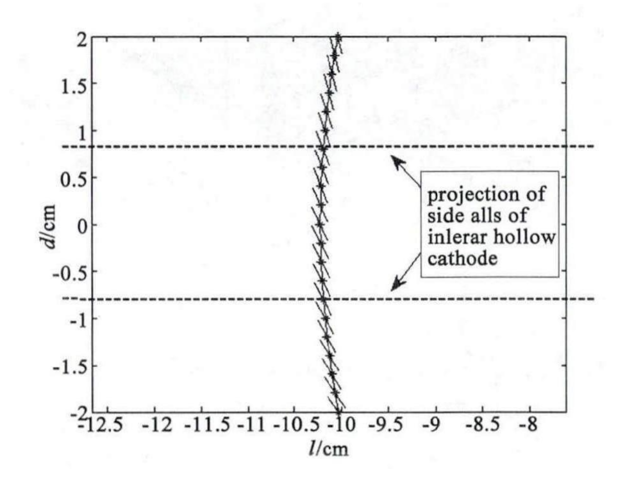


图2　郎缪尔探针等效扫描效果图

Fig. 2　Equivalent scanning of the Langmuir probe

为了获取脉冲放电期间高时间分辨率的等离子体参数,数据采集时,将探针电压设置成扫描周期远大于脉冲放电周期的“慢扫”锯齿波信号,利用

示波器的快帧功能将慢扫周期内每一个放电脉冲期间的探针收集电流保存为一帧;数据后处理时,由于每帧探针收集电流对应的探针扫描电压近似相等,从而不难得到每帧探针电流数据对应的探针扫描电压值,从保存的探针收集电流帧中提取同一放电时刻的探针收集电流数据从而得到了与扫描电压相应的探针电流值,得到一组完整的探针伏安曲线,由于每一帧探针电流数据记录一个完整脉冲放电过程中的多个放电时刻的采样值,因此可以获得覆盖脉冲放电过程的多个放电时刻的伏安曲线,帧内采样率越高,所得到的伏安特性曲线组数越多;最后,通过数据处理得到脉冲放电过程中高时间分辨率的等离子体参数。图3为本实验中一个锯齿波慢扫周期内利用快帧法记录的探针收集电流数据,坐标轴 time 表示脉冲放电时间,坐标轴 frame number 为示波器记录的数据帧数,锯齿波慢扫周期为20 s,脉冲放电周期为0.02 s,示波器连续存储扫描周期内1000次放电脉冲期间的郎缪尔探针收集电流信号共计1000帧(为了方便显示,图3中只画出了部分帧的数据);帧内采样点数设计为1000个,采样点时间分辨率为0.5 μs,在数据后处理过程中,理论上可以提取1000组伏安特性曲线,但每帧内等离子体存在的时间只有200 μs,因此,有效的伏安特性曲线组数为400组。

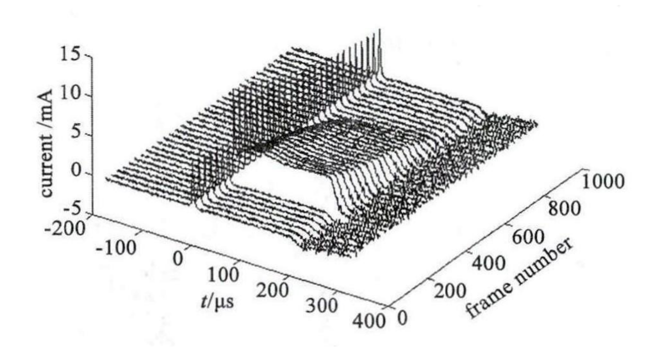


图3 一个锯齿波慢扫周期内利用快帧法记录的探针收集电流数据

Fig. 3 Electron densities diagnosed with Langmuir probe and recorded with an fast oscilloscope

为了降低探针污染的影响,测量过程中定时对探针进行了清洗,同时考虑到相邻采样点之间等离子体参数变化不大,为了降低噪声影响减小测量误差,在利用伏安曲线对等离子体参数计算之前,对脉冲放电稳定期连续5个采样点、放电不稳定期连续3个采样点的伏安特性曲线进行了平均处理。本实验尽管使用了(1.5~3.0)×10^{-2} T的磁场,由于离子的碰撞频率远大于其在磁场中的回旋运动频率,离子并未被磁化[2],因此,选用饱和离子流对等离子体密度参数进行了诊断测量。Chen 等[11]研究表明电子密度范围在10^{10}~10^{12} cm^{-3}时的低温等离子体,探针的饱和离子流 I_i 与探针电位 V_p 满足关系式(1)

$$I_i \propto V_p^{3/4} \tag{1}$$

将饱和离子流条件下的伏安曲线按照式(1)进行线性拟合不难获得探针电位等于悬浮电位时的饱和离子粒子流 I_i 的值,离子饱和流 I_i 又满足玻姆电流公式[11]

$$I_i = 0.605 n_o e S_i \sqrt{\frac{T_e}{m_i}} \tag{2}$$

式中,n_o 为离子数密度;e 为基本电荷量;S_i 为鞘层收集离子的有效面积,假设探针电位等于悬浮电位时 S_i 等于探针的表面积 S;m_i 为离子质量;T_e 为电子温度,单位为 eV,其可通过去除饱和离子流后的半对数伏安特性曲线斜率求倒数而得到。由式(2)可得到等离子体离子数密度 n_o,根据等离子体准中性原理,电子数密度 $n_e \approx n_o$。

2 实验结果与分析

利用图1所示实验装置,在气压为150 Pa,放电电流为2 A条件下,分别得到了1.5×10^{-2},2.25×10^{-2},3.0×10^{-2} T磁场约束下的三种大面积等离子体片,持续时间为200 μs,图4为采用快帧法和旋转空心阴极法利用郎缪尔探针测得的三种等离子体片厚度方向电子密度分布及其演化构成的二维分布图。图中厚度方向距离 d 的0 mm对应等离子体片的厚度中心,坐标值的正负分别代表厚度中心的两侧,坐标大小代表与厚度中心之间的距离,脉冲放电时间包括了等离子形成后到熄灭前主要的放电阶段(并不包含放电的初始及熄灭阶段)。由图4(a)可知1.5×10^{-2} T磁场时等离子体片厚度方向的电子密度分布尚未出现分层现象,只有一个密度峰值;当磁场增加到2.25×10^{-2} T时,图4(b)中等离子体片厚度方向出现分层现象,厚度方向出现两个密度峰值,但是峰值间距较小;当磁场增加到3.0×10^{-2} T时,图4(c)中等离子体片厚度方向密度峰值之间的间距进一步增大,分层更加明显。

从图4可知,脉冲放电初始的100 μs内,等离子体放电很不稳定,但之后厚度方向电子密度分布

变化很小。从图 4 中电子密度稳定期内提取 160 μs 时的厚度方向电子密度分布,如图 5 所示。由图可知,1.5×10^{-2} T 磁场时,等离子体片厚度方向呈现出高斯型的密度分布特征,厚度方向只有一个密度峰值且位于厚度方向中心,许多研究者都报道过类似的实验结果[12-16];当磁场增加到 2.25×10^{-2} T 时厚度方向电子密度分布呈现出双峰曲线形分布特征,两密度峰值对称分布于厚度中心两侧,两峰间距为 3.2 mm;磁场增加到 3.0×10^{-2} T 时,厚度中心电子密度值与峰值电子密度的间距进一步增大至 8.6 mm 使得两个密度峰值更加明显,双峰曲线分布特征更加明显。

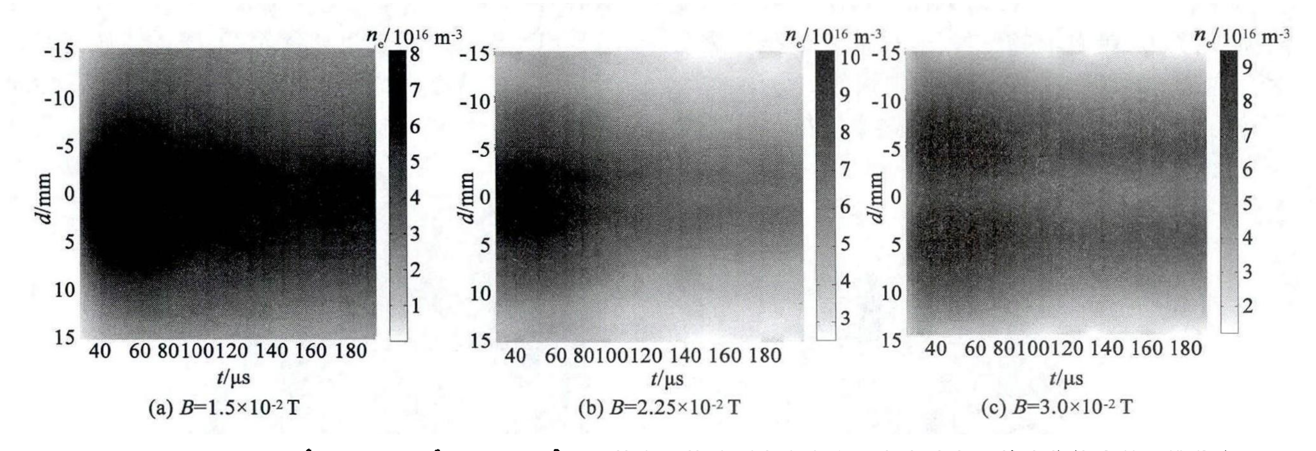


图 4　磁场 $B=1.5\times10^{-2}$,2.25×10^{-2},3.0×10^{-2} T 时等离子体片厚度方向电子密度分布及其演化构成的二维分布图

Fig. 4　Time evolution of the 2-D electron density distribution in the normal direction at $B=1.5\times10^{-2}$ T, 2.25×10^{-2} T, and 3.0×10^{-2} T, respectively

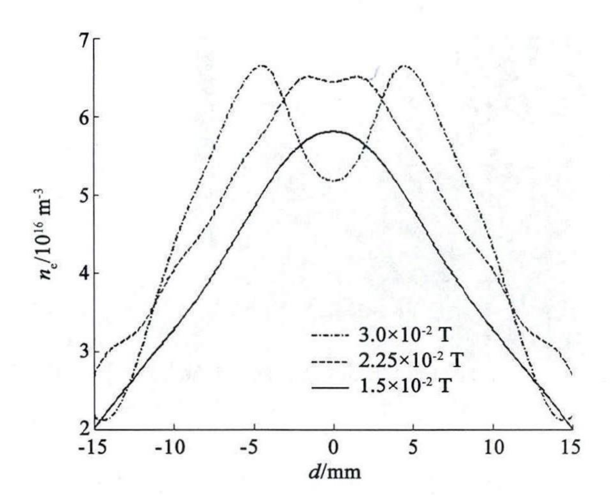


图 5　脉冲放电时间为 160 μs,磁场 $B=1.5\times10^{-2}$,2.25×10^{-2},3.0×10^{-2} T 的磁化等离子体片厚度方向电子密度分布图

Fig. 5　Electron density distributions for a pulse duration of 160 μs and at magnetic fields of 1.5×10^{-2}, 2.25×10^{-2}, 3.0×10^{-2} T, respectively

对于线形空心阴极放电过程中发生的分层现象,Manheimer 等[5]认为这是由空心阴极侧壁发射的高能二次电子的回旋运动半径小于空心阴极宽度一半所引起的。线形空心阴极在增强型辉光放电形成大面积等离子体片过程中,空心阴极侧壁产生高能二次电子在约束磁场 B 中绕磁力线作回旋运动,其回旋运动半径 r 可表示为

$$r=\frac{m_e V}{q_e B}=\frac{\sqrt{2m_e E}}{q_e B} \tag{3}$$

式中 m_e、q_e、V、E 分别为电子的质量、电荷量、垂直磁场的运动速度,垂直磁场方向运动的动能,由式(3)可知电子的回旋运动半径与磁场的大小成反比,由于高能二次电子电离中性气体原子是维持等离子体片的主要电离机制,当磁场强度太大致使空心阴极两侧壁产生的高能二次电子由于回旋运动半径太小而不能到达空心阴极厚度方向中心位置时,厚度方向中心区域由于没有高能二次电子的电离作用无法形成等离子体,与这一区域相应空心阴极底部由于缺少离子轰击也无法产生二次电子,最终导致等离子体厚度中心电子密度较低,而厚度中心两侧由于有大量高能二次电子,因此形成了密度较高的等离子体区,磁场越强,高能二次电子的回旋运动半径越小等离子体片厚度中心无法形成等离子体的区域越大,厚度方向峰值密度的间距就越大,分层现象越明显,这就解释了图 4 所示的实验

结果。

为了研究脉冲放电电流对等离子体片分层的影响,利用图1所示实验装置,在 3.0×10^{-2} T磁约束条件下,调节脉冲放电电压获得放电电流分别为1,2,3,4 A的大面积等离子体片,采用快帧法和旋转空心阴极法利用郎缪尔探针测得电子密度分布随脉冲放电时间的演化图,如图6所示。由图6可知随着脉冲放电电流的增加,分层等离子体片两个密度峰值的间距减小,以稳定放电期内160 μs时的厚度方向电子密度分布为例,通过数据拟合计算得到1,2,3,4 A分层等离子体片厚度方向电子密度峰间距分别为8.6,8.2,6.8,5.0 mm。这一现象也可以用式(3)来解释,由式(3)可知粒子在磁场中的回旋运动半径除了与磁场相关还与高能二次电子垂直磁场运动的动能的开方成正比,在脉冲磁约束线形空心放电过程中,脉冲的放电电流(放电电压)越大,阴极发射高能二次电子的能量越大,因此高能二次电子的回旋运动半径越大,等离子体片分层时其厚度中心无法形成等离子体的区域越小,双峰间距越小,分层越不明显。

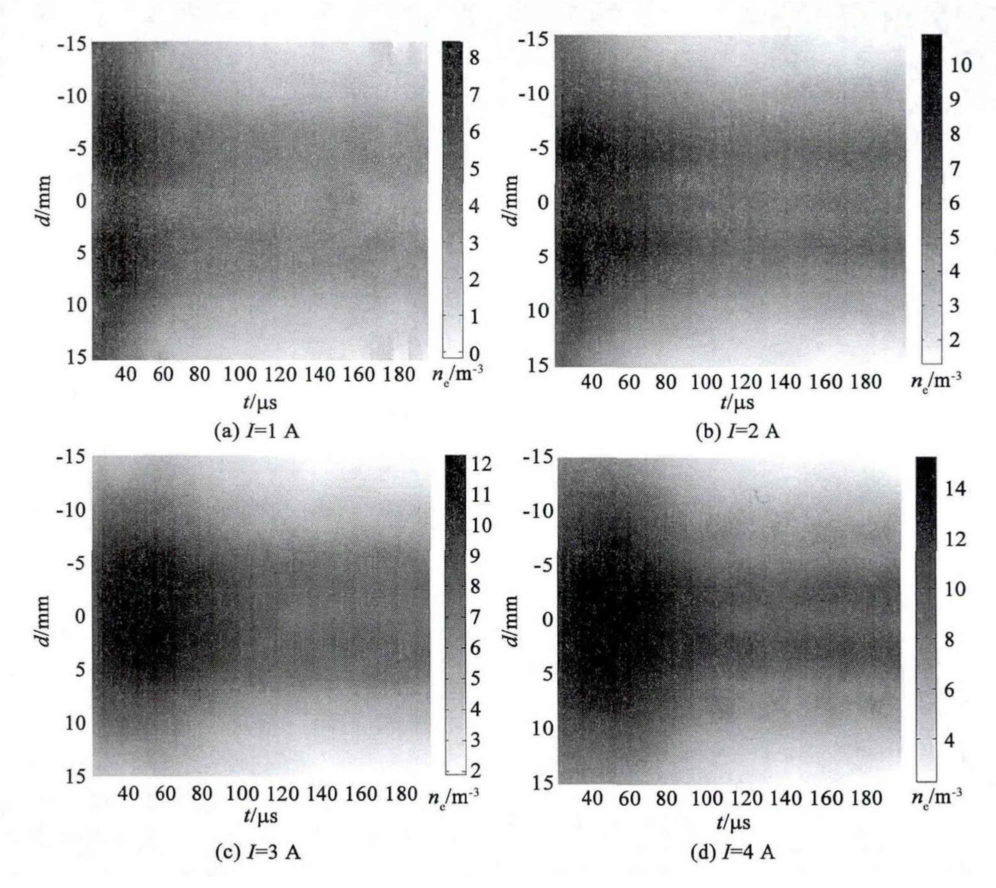


图6 $B=3.0\times10^{-2}$ T,放电电流为 $I=1,2,3,4$ A时等离子体片厚度方向电子密度分布及其演化构成的二维分布图

Fig. 6 2D electron density distribution in the normal direction at a field of 3.0×10^{2} T and discharge currents of 1,2,3,4 A, respectively

3 结论

利用脉冲磁约束线形空心阴极放电装置,在150 Pa氦气中产生了持续时间为200 μs、面积为60 cm×60 cm的大面积等离子体片,采用快帧法和旋转空心阴极法首次获得了强磁场条件下分层等离子体片厚度方向电子密度分布及其演化构成的二维分布图,实验产生的等离子体片在磁场大于 2.25×10^{-2} T时厚度方向电子密度发生了分层现象,分层等离子体片厚度方向电子密度呈现出双峰曲线的分布特征,两个密度峰对称分布于厚度中心两侧,磁场越强双峰间距越大;在 3.0×10^{-2} T磁场条件下,在1~4 A范围内改变放电电流,放电电流越大,分层等离子体片双峰间距越小,等离子体片的分层现象越不明显。分析表明等离子体的分层现象主要与线形空心阴极两侧壁产生的高能二次电子的回旋运动相关,改变磁场或者通过调节放电电

流改变高能二次电子的能量都会影响高能二次电子的回旋运动半径,进而影响等离子体片分层现象是否出现以及分层间距的大小。因此,等离子体片的分层现象受磁场与放电电流的共同影响。

参 考 文 献

[1] Caillault L, Larigaldie S. Mechanisms of a Linear Hollow Cathode Used for the Production of a Hellium Plasma Sheet[J]. J Phys D: Appl Phys, 2002, 35: 1010 - 1019

[2] Mathew J, Fernsler R F, Meger R A, et al. Generatation of Large Area, Sheet Plasma Mirrors for Redirecting High Frequency Microwave Beams[J]. Phys Rev Letter, 1996, 77(10): 1982 - 1985

[3] Manheimer W M. Plasma Reflectors For Electroic Beam Steering[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1991, 19(6): 1228 - 1234

[4] Fernsler R F, Manheimer W M, Meger R A, et al. Production of Large-area Plasmas by Electron Beanms[J]. Phys Plasmas, 1998, 5(5): 2137 - 2143

[5] Manheimer W M, Fernsler R F, Gitlin M S. High Power, Fast, Microwave Components Based on Beam Generated Plasmas[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 1998, 26(5): 1543 - 15551

[6] Gillman E D, Amatucci W E. Early Results of Microwave Transmission Experiments Through an Overly Dense Rectangular Plasma Sheet with Microparicle Injection[J]. Physics of Plasma, 2014, 21(6): 060701 - 1 - 5

[7] Zhang L, Zhang H X, Yang X Z, et al. Sheet Plasma Produced by Hollow Cathode Discharge[J]. CHIN PHYS LETT, 2003, 20(11): 1984 - 1987

[8] 王晓冬,张 扬,王 庆,等,郎缪尔探针低温低压等离子体诊断[J]. 真空科学与技术学报,2013,33(11): 995 - 997

[9] 丁 亮,霍文青,杨新杰,等. 大面积等离子体片密度分布分析[J]. 物理学报,2012,61(11): 115204 - 1 - 5

[10] Mathew J, Meger R A, Fernsler R F. Retarding Field Energy Analyzer for the Characterization of Negative Glow Sheet Plasmas in a Magnetic Field[J]. Rev Sci Instrum, 1996, 67(8): 2818 - 2825

[11] Chen F F, Even J D, Arnush D. A Floating Potential Method for Measuring Ion density[J]. Phys Plasmas, 2002, 9(4): 1449 - 1455

[12] Lock E H, Fernsler R F, Walton S G. Experimental and Theoretical Evaluations of Electron Temperature in Continuous Electron Beam Generated Plasmas[J]. Plasma Sources Sci Technol, 2008, 17: 025009 - 1 - 8

[13] Wan J, Jia X L, Yang J H, et al. Reflection of Electromagnetic Wave Using a Plasma Sheet[J]. IEEE Trans Plasma Sci, 2010, 38 (8): 2006 - 2009

[14] Larigaldie S, Caillault L. Dynamics of a He Plasma Sheet Created by a Hollow-Cathode Electron Beam[J]. J Phys D: Appl Phys, 2000, 33: 3190 - 3197

[15] Leonhardt D, Walton S G, Blackwell D D, et al. Plasma Diagnostics in Large Area Plasma Processing System [J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2001, A19(4): 1367 - 1373

[16] Blackwell D D, Walton S G, Leonhardt D, et al. Probe Diagnostic Development for Electron Beam Produced Plasmas[J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 2001, A19(4): 1330 - 1335